

УДК 615.47

С.А. Найда, д-р техн. наук

Принципы построения пьезоэлектрических преобразователей акустотермометра

Рассмотрены конструктивные особенности пьезопреобразователей для акустотермометрии. Рассчитана пассивная фокусирующая система для акустотермометра. Оценены основные характеристики качества фокусировки. Получены значения напряжений шумов на выходе пьезопреобразователя фокусируемого акустотермометра.

Design features of piezoelectric transducer for an acoustothermometry are considered. The passive focusing system for acoustothermometer is calculated. The main quality characteristics of focusing are estimated. Values of a focused acoustothermometer piezoelectric transducer exit noise voltages are received.

Ключевые слова: пьезопреобразователь, фокусировка, внутренняя температура, акустотермометр, согласующий слой, акустическая линза.

Введение

Пространственно-временное распределение глубинной (внутренней) температуры, несущее информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов, может быть успешно использовано для неразрушающего контроля любых материалов [1], технической и медицинской диагностики.

Среди большого разнообразия способов измерения температуры особое место занимают пассивные методы, основанные на измерении физических полей, возникающих в результате естественного функционирования объекта. Тепловое излучение, позволяющее определять глубинную температуру, является источником электромагнитного поля в диапазонах сверхвысоких частот (СВЧ), инфракрасного (ИК) излучения, а также акустического в ультразвуковом (УЗ) диапазоне [2].

В работах [3, 4] на примере биологической ткани был проведен сравнительный анализ пассивных методов регистрации теплового излучения (ИК тепловидения, радио- и акустотермографии), который показал, что ИК тепловидение имеет недостаточную глубину проникновения, радиотермография обладает низкой точностью определения температуры на высоких частотах, значительным затуханием и малой

глубиной проникновения на низких частотах, значительным снижением точности измерений с увеличением глубины. В свою очередь, акустотермография характеризуется лучшим пространственным разрешением, большей глубиной зондирования, меньшим затуханием, что свидетельствует о перспективах ее использования для получения динамического функционального изображения объекта.

Интенсивность теплового акустического излучения измеряют акустотермометром (АТ), реализующим, как правило, схему нулевого модуляционного метода приема слабого сигнала [5].

Для измерения температуры используют выражение для квадрата акустического давления p^2 , соответствующего тепловым колебаниям безграничной вязкоупругой среды с температурой T :

$$p^2 = \frac{4\pi f^2}{v} \rho k T \Delta f \quad (1)$$

где f – частота; v – скорость акустической волны; ρ – плотность среды; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; Δf – полоса частот, выделяемая приемником или усилителем высокой из спектра шума.

Соотношение (1) получено из закона излучения безграничной среды Рэлея-Джинса, являющегося частным случаем закона Планка излучения абсолютно черного тела при $hf \ll kT$ (h – постоянная Планка):

$$\varepsilon(f, T) = dI / df = \left(2\pi f^2 / v^2 \right) kT,$$

где ε – спектральная плотность; I – интенсивность излучения.

В литературных источниках [6, 7] приведены данные о получении распределения внутренней температуры по глубине с помощью двухспектрального зондирования в среде с частотно-зависимым затуханием. В качестве модели рассматривалась однородная среда с постоянной известной температурой T_0 , в которой на глубине z при $x > 0$ имелся участок, нагретый относительно среды на температуру ΔT . Необходимо было определить величину нагрева участка ΔT и его глубины z .

Для решения поставленной задачи на частотах f_1 и f_2 измеряли температуры $T_1 = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_1)$ и $T_2 = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_2)$ (δ_1 и δ_2 – длины затухания на соответствующих частотах), затем составляли систему уравнений относительно ΔT и z , решением которой были следующие выражения:

$$\Delta T = \left(\frac{[T_1 - T_0]^{\delta_1}}{[T_2 - T_0]^{\delta_2}} \right)^{\frac{1}{\delta_2 - \delta_1}}, \quad z = \ln \left(\frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} \right) \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 - \delta_2}.$$

Помимо того, что вышеуказанный метод требует априорного знания частотно-зависимого коэффициента поглощения, результаты, полученные с его помощью, показали, что достигнутая точность измерений температуры примерно в десять раз хуже предельно допустимой, рассчитанной теоретически. Это означает, что чувствительность аппаратуры ограничена не флуктуациями сигнала, а шумами экспериментальной установки. Следовательно, чтобы повысить значение точности до пороговой, необходимо модифицировать метод измерений, а также схему его реализации.

В связи с этим в работах [3, 8] было предложено использовать фокусируемый АТ, с помощью которого можно проводить измерения абсолютной температуры с высокой точностью одночастотным одноканальным методом.

Целью настоящей работы является сформулировать принципы построения пьезопреобразователя (ПП) и рассчитать систему фокусировки для вышеуказанного типа АТ.

1. Конструктивные особенности фокусируемого пьезоприемника для акустотермометра

Чтобы измерить внутреннюю температуру одночастотным одноканальным методом, необходимо, чтобы полоса частот ПП перекрывала весь частотный диапазон акустического излучения из диагностируемого объекта, т.е. приемный тракт должен быть достаточно широкополосным.

Для расширения полосы электроакустического тракта АТ используют корректирующие электрические цепи и акустические согласующие слои [9].

В простейшем случае параллельно ПП подключают индуктивность, которая на частоте антитрезонанса ω_0 компенсирует электрическую емкость зажатой пьезопластины C_0 и повышает чувствительность пьезоприемника на частотах ω , отличающихся от антитрезонансной.

Система согласующих слоев осуществляет широкополосное согласование приемного тракта и рабочей среды, причем оптимальной с точки зрения соотношения между коэффициентом передачи и входным электрическим импедансом конструкцией ПП для измерения внутренней температуры одноканальным одночастотным методом является конструкция с двумя четвертьволновыми слоями [10].

Следует отметить, что введение тыльного демпфирования, позволяющего выровнять амплитудно-частотную характеристику и расширить диапазон частот, для акустотермометрии не может быть использовано, т.к. оно приводит к значительному снижению коэффициента передачи ПП.

Одним из способов преобразования плоского волнового фронта в сходящийся является применение акустических линз (пассивных фокусирующих систем), которые осуществляют фокусирование упругих волн путем изменения акустического пути и преломления (рефракции) волн на границе раздела между материалом линзы и окружающей ее средой [11]. В работе [8] показано, что для фокусируемого АТ плосковогнутая эллиптическая линза является наиболее эффективной.

Что касается материалов для изготовления фокусируемого ПП, то в работе [10] было отмечено, что наилучшие характеристики наблюдались, для случая, когда в качестве материала пьезопластины использовалась пьезокерамика PZT-8, первого согласующего слоя – эпоксидный клей, второго слоя (акустической линзы) – полистирол.

2. Фокусировка теплового акустического излучения с помощью акустической линзы

Приведем основные расчетные соотношения для плоско-вогнутой собирающей линзы [12] (рис. 1).

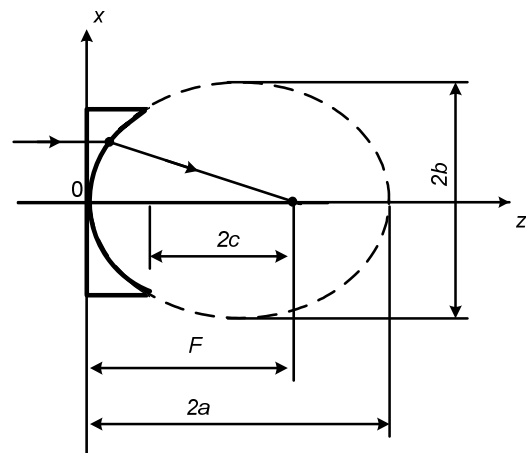


Рис. 1. Плоско-вогнутая эллиптическая линза

Уравнение преломляющей поверхности такой линзы в прямоугольной системе координат $(z; x)$ с началом в вершине линзы:

$$\frac{(z-a)^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

где a – большая, b – малая оси, а ось z совпадает с акустической осью линзы.

Геометрические элементы линзы – полуоси a , b , расстояние между фокусами кривых второго порядка $2c$ – связаны с фокусным расстоянием линзы F и показателем преломления ее материала $n = c_{\text{ср}} / c_{\text{л}}$ простыми соотношениями:

$$a = \frac{F}{1+n}; b = F \sqrt{\frac{1-n}{1+n}}; c = F \frac{n}{1+n}. \quad (3)$$

Уравнение линии сечения поверхности безабберационной линзы плоскостью xOz :

$$x^2 - z(1-n)2F + z^2(1-n^2) = 0, \quad n < 1. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) относительно z имеет вид:

$$z = \frac{F(1-n) - \sqrt{F^2(1-n^2) - (1-n^2)x^2}}{1-n^2}. \quad (5)$$

Фокусное расстояние:

$$F(\theta) = R_{\text{л}} \left(1 + \frac{1}{\cos \theta \left[\sqrt{1 + (1-n^2) / (n^2 \cos^2 \theta)} - 1 \right]} \right), \quad (6)$$

где $R_{\text{л}}$ – радиус кривизны линзы; θ – угол падения лучей.

Для вогнутой линзы необходимо, чтобы выполнялось соотношение:

$$F \geq \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1+n}{1-n}},$$

где D – апертура линзы.

Для лучей, у которых $\theta \approx 0$ и, соответственно, $\cos \theta \approx 1$

$$F(\theta \approx 0) = F_0 = \frac{R_{\text{л}}}{1-n}. \quad (7)$$

Смещение фокуса в сторону линзы при изменении угла падения от 0 до θ_{max} (абберация) равна

$$\Delta F = F_0 - F(\theta_{\text{max}}), \quad (8)$$

где $\theta_{\text{max}} = \arcsin \frac{D/2}{R_{\text{л}}}$ – угол раскрытия всего волнового фронта.

Для плоско-вогнутой собирающей линзы из полистирола с апертурой $2 \cdot 10^{-2}$ м, радиусом кривизны 0,016 м на основании соотношений (2)-(8) были получены следующие результаты: показатель преломления $n = 0,655$; фокусное расстояние для случая $\theta \approx 0$ $F_0 = 0,046$ м; угол раскрытия всего волнового фронта $\theta_{\text{max}} = 38,68^\circ$; фокусное расстояние для случая $\theta = \theta_{\text{max}}$ $F(\theta_{\text{max}}) = 0,042$ м; абберация $\Delta F = 4 \cdot 10^{-3}$ м. Геометрические элементы линзы: большая полуось $a = 0,028$ м; малая полуось $b = 0,021$ м; расстояние между фокусами второго порядка $c = 0,018$ м. Уравнение преломляющей поверхности линзы в прямоугольной системе координат $(z; x)$ с началом в вершине линзы:

$$\frac{(z-0,028)^2}{0,78 \cdot 10^{-3}} + \frac{x^2}{0,44 \cdot 10^{-3}} = 1.$$

Уравнение линии сечения поверхности безабберационной линзы плоскостью xOz :

$$x^2 - 0,032z + 0,57z^2 = 0, \quad n < 1.$$

Решение уравнения относительно z :

$$z = 0,028 - \sqrt{0,78 \cdot 10^{-3} - 1,75x^2}. \quad (9)$$

График зависимости (9) представлен на рис. 2.

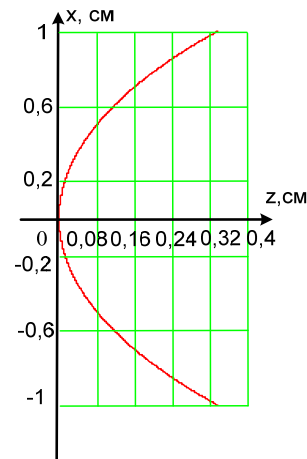


Рис. 2. Форма линии сечения поверхности линзы

3. Полевые характеристики сферического волнового фронта

Основными характеристиками качества фокусировки звука являются форма и размеры фокальной области, а также коэффициент усиления по давлению, представляющий собой отношение звукового давления в центре (или на оси) фокальной области к давлению на входе системы.

При исследовании полей сходящихся волновых фронтов основное внимание уделяют распределениям поля по акустической оси и в фокальной плоскости.

Потенциал в произвольной точке M задается формулой Грина:

$$\Phi(M) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} \left[\left[\frac{d\Phi}{dn} \right]_{\Sigma} \frac{h[-kR]}{R} - \Phi_{\Sigma} \frac{d}{dn} \frac{h[-kR]}{R} \right] d\Sigma, \quad (10)$$

где n – нормаль к поверхности волнового фронта;

$h[-kR] = \exp(-ikR)$, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c_{\text{ср}}}$ – волновое число;

R – расстояние от точки M до поверхности Σ , ограничивающей волновой фронт.

Чтобы вычислить потенциал при помощи формулы (10), необходимо на поверхности Σ задать нормальную составляющую колебательной скорости и давление. Последние величины однозначно связаны между собой, поэтому их нельзя задавать независимо. В этом случае используют следующие приближения [11]:

1. $kR \gg 1$ – рассматривают поля на больших расстояниях от излучающей поверхности;

2. $kF \gg 1$ – предполагают, что нормальные составляющие скорости и давления на поверхности фронта связаны соотношением $P_{\Sigma} / v_{\Sigma} = \rho c$ (как в случае плоской волны);

3. $\cos(\hat{n}, \vec{R}) \approx 1$ – приближение Кирхгофа

(считают, что углы между нормалью к излучающей поверхности и направлениями на точку наблюдения малы).

С учетом первых двух приближений выражение (10) принимает следующий вид:

$$\Phi(M) = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} v_{\Sigma} \frac{h[-kR]}{R} \left(1 + \cos(\hat{n}, \vec{R}) \right) d\Sigma. \quad (11)$$

И, наконец, используя приближение Кирхгофа, из выражения (11) получим формулу Рэлея:

$$\Phi(M) = -\frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma} v_{\Sigma} \frac{h[-kR]}{R} d\Sigma. \quad (12)$$

Если предположить, что скорость $v_{\Sigma} = v_0 = \text{const}$ (однородный волновой фронт), подставить в (12) выражение $d\Sigma = \frac{FR}{z_0} dR d\varphi$ и проинтегрировать, то получим:

$$\Phi(M) = -\frac{2Fv_0}{kz_0} h(-\Delta) \sin(\Delta a), \quad (13)$$

где z_0 – координата точки наблюдения, расположенной на оси, $\Delta = k(R_m + R_0) / 2$;

$\Delta a = k(R_m - R_0) / 2$ (R_m, R_0 – расстояния от точки наблюдения M до края и центра волнового фронта соответственно).

Если перейти в выражении (13) от потенциала к звуковому давлению, и провести ряд преобразований, подробно изложенных в [12], получим выражение для распределения звукового давления вдоль акустической оси:

$$\left| \frac{P_a}{P_F} \right| = \frac{2}{K_p \xi} \left| \sin \left(\frac{K_p}{2} \cdot \frac{\xi}{1-\xi} \right) \right|, \quad (14)$$

где $K_p = kF(1 - \cos \theta_{\text{max}})$ – коэффициент усиления по давлению; $\xi = kz$ – обобщенная координата.

Приравняв $\left| \frac{P_a}{P_F} \right| = 0,707$ и приняв во внимание, что $K_p \gg 1$, получим приближенное выражение для длины фокальной области:

$$2\Delta z_0 = 7,1\lambda (F/D)^2. \quad (15)$$

Ширина УЗ пучка на уровне $P/P_0 = 0,707$ в фокальной области:

$$2x_{0,707} = 1,02\lambda (F/D). \quad (16)$$

Для плоско-вогнутой собирающей линзы из полистирола с апертурой $2 \cdot 10^{-2}$ м, радиусом кривизны 0,016 м на основании соотношений (14)-(16) были получены следующие результаты:

- длина фокальной области на уровне 0,707 $2\Delta z_0 = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м;
- ширина УЗ пучка на уровне 0,707 в фокальной области $2x_{0,707} = 0,14 \cdot 10^{-2}$ м;
- волновое число $k = 1,077 \cdot 10^4$ рад/м; коэффициент усиления по давлению $K_p = 108,68$.

График зависимости (14) для рассматриваемого случая представлен на рис. 3.

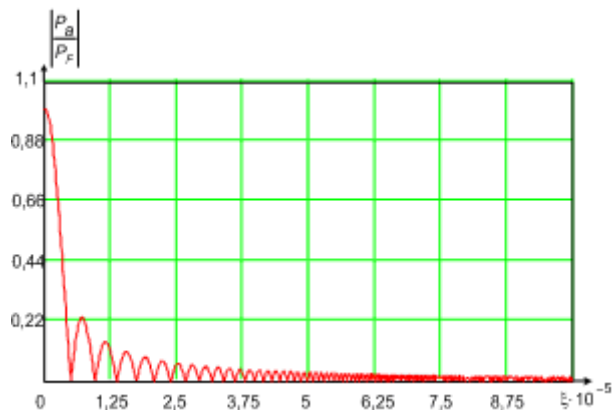


Рис. 3. Распределение звукового давления вдоль акустической оси

4. Шумы на выходе ПП

При измерении температуры акустотермометром, квадрат суммарного напряжения на выходе пьезоприемника представляет собой сумму квадратов независимых напряжений [8]:

$$\bar{U}_{\Sigma}^2 = \bar{U}_{\text{ПП}}^2 + \bar{U}_a^2, \quad (17)$$

где $\bar{U}_{\text{ПП}}^2$ – квадрат эффективного напряжения, обусловленного собственным тепловым электрическим шумом ПП; \bar{U}_a^2 – квадрат напряжения, обусловленного акустическим тепловым излучением из глубины исследуемого объекта.

Тепловые шумы в пьезоэлектриках полностью описываются формулой Найквиста [9]:

$$\bar{U}_{\text{ПП}}^2 = 4R_0 k T \Delta f, \quad (18)$$

где R_0 – действительная часть входного электрического импеданса нагруженного пьезоприемника.

В свою очередь, квадрат напряжения

$$\bar{U}_a^2 = K_{\text{ш}}^2 \langle p^2 \rangle_s, \quad (19)$$

где $K_{\text{ш}} = K_{\text{П}}(f) / \sqrt{K}$ – коэффициент преобразования давления в напряжение ($K_{\text{П}}(f)$ – коэффициент преобразования в напряжение давления плоской волны, падающей на пьезопластину в направлении нормали к ее поверхности; $K = 4\pi A_0 / \lambda^2$ – осевой коэффициент концентрации пьезопластины площадью A_0 с длиной волны λ); $\langle p^2 \rangle_s = p^2 / K$ – среднее по поверхности и по времени давление.

Для механически недемпфированного ПП с нагрузкой в виде параллельно подключенной индуктивности, пьезопластиной из пьезокерамики PZT-8, четвертьволновым согласующим слоем из эпоксидного клея и плоско-вогнутой эллиптической линзой из полистирола на основании формул (1), (17)–(19) и результатов, приведенных в работе [10] (в качестве рабочей среды рассматривалась биоткань), были получены следующие значения для шумов на выходе ПП:

$$\bar{U}_{\text{ПП}} = 1,48 \cdot 10^{-6} \text{ В};$$

$$\bar{U}_a = 157,2 \cdot 10^{-6} \text{ В};$$

$$\bar{U}_{\Sigma} = 157,2 \cdot 10^{-6} \text{ В}.$$

Полученные результаты говорят о том, что основной вклад в напряжение на выходе ПП фокусируемого АТ дает полезный сигнал – аку-

стическое излучение из объекта, а собственными шумами ПП можно пренебречь.

Выводы

Установлено, что для фокусируемого АТ, обладающего удовлетворительными характеристиками для проведения неразрушающего контроля, в частности медицинской диагностики, ПП должен содержать: пьезопластину из пьезокерамики PZT-8, четвертьволновой согласующий слой из эпоксидного клея, в качестве фокусирующей системы – плоско-вогнутую эллиптическую линзу из полистирола, быть механически недемпфированным с тыльной стороны и электрически нагруженным параллельно подключенной индуктивностью.

Использование данных конструктивных элементов пьезоприемника позволяет измерять температуру на глубине до 5 см с пространственным разрешением порядка 1 мм, а также способствует увеличению соотношения сигнал/шум на его выходе.

Литература:

1. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / Каневский И.Н. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
2. Годик Э.Э. Физические поля человека и животных / Годик Э.Э., Гуляев Ю.В. // В мире науки. – 1990. – №5. – С.75–83.
3. Найда С.А. Акустотермометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегагерцевого диапазона / Найда С.А. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – №3. – С.41–48.
4. Дрозденко Е.С. Определение внутренней температуры биологического объекта по его тепловому акустическому излучению / Дрозденко Е.С. // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте". – Одесса, июнь, 2009. – С.22–24.
5. Дидковский В.С. Нулевой модуляционный метод измерения теплового акустического излучения биологических объектов / Дидковский В.С., Найда С.А. // Электроника и связь. – 2000. – Т.2, № 8. – С. 253–256.
6. Гуляев Ю.В. О возможностях акустической термографии биологических объектов / [Гуляев Ю.В., Годик Э.Э., Дементенко В.В., Пасечник В.И., Рубцов А.А.] // Доклады АН СССР. – 1985. – Т.183, №6 – С. 1495–1499.

7. *Миргородский В.И.* Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению / [Миргородский В.И., Пасечник В.И., Пешин С.В., Рубцов А.А., Годик Э.Э. и др.] // Доклады АН СССР. – 1987. – Т.297, №6 – С.1370-1372.
8. *Найда С.А.* Пьезоприемники теплового акустического излучения для зондирования внутренней температуры объектов / Найда С.А. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – №1. – С. 25-29.
9. *Домаркас В.И.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 258с.
10. *Дрозденко Е.С.* Фокусируемые приемники для акустотермометрии / Дрозденко Е.С., Найда С.А. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – №2. – С.
11. *Каневский И.Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн / Каневский И.Н. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
12. *Дідковський В.С.* П'єзоелектричні перетворювачі медичних ультразвукових сканерів: Навч. посібник / Дідковський В.С., Найда С.А. – К.: НТУУ"КПІ", 1999. – 179 с.